

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВИНТОВОГО Г-ОБРАЗНОГО НОЖА ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ФРЕЗЫ

MODELING THE OPERATION OF A SCREW L-SHAPED KNIFE OF A TILLER

С.Б. ДРАНЯЕВ
М.Н. ЧАТКИН, д.т.н.
С.М. КОРЯВИН

Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарева,
s.dranyaev2010@yandex.ru

S.B. DRANYAEV,
M.N. CHATKIN, DSc in Engineering
S.M. KORYAVIN

N.P.Ogarev Mordovia State University, s.dranyaev2010@yandex.ru

Стандартные Г-образные ножи при работе подвергаются воздействию различного рода нагрузкам. Форма лезвий Г-образных ножей не отвечает требованию выполнения скользящего резания, что приводит к повышению энергоемкости фрезерования почвы. Для обеспечения оптимальных условий резания без обволакивания сорняками и забивания ножей необходимо, чтобы в любом сечении лезвия (в плоскости вращения) угол его установки γ (резания) был постоянен. Поэтому лезвие ножа следует выполнить по винтовой линии, что позволит обеспечить его плавное вхождение и скользящее резание при движении в почве. Цель исследования – повышение качества и снижение энергозатрат обработки почвы путем выбора рационального угла установки лезвия и оптимизации параметров винтовых Г-образных ножей фрезы. Для изучения работы и процесса нагружения винтового Г-образного ножа фрезы использовался метод конечных элементов из прикладной библиотеки АРМ FEM системы КОМПАС-3D. Конструкцию ножа разбивали на элементы, чтобы показать их перемещения и деформации через смещения граничных точек (узлов) элемента, затем определяли узловые смещения, деформации и напряжения. В ходе исследования изучалась зависимость значений линейных перемещений и величин напряжений в зависимости от угла установки лезвия ножа ($\gamma = 35^\circ \dots 60^\circ$). Результаты исследования показали, что при увеличении угла установки лезвия до $\gamma = 60^\circ$ суммарные линейные перемещения уменьшились на 18 % достигнув 0,6978 мм, по сравнению с $\gamma = 35^\circ$ (0,8455 мм) при максимальной нагрузке 2000 Н. Нож с углом установки $\gamma = 60^\circ$ имеет значения коэффициента запаса прочности выше, чем нож с $\gamma = 35^\circ$ по всем ступеням нагрузки (500, 1000, 1500 и 2000 Н). Винтовой нож с большим углом установки наиболее приемлем для фрезерования почвы со скольжением, что характерно при обработке дернины. В результате исследования предложено для фрезерования почвы с высоким качеством использовать ножи с винтовой рабочей поверхностью.

Ключевые слова: почвообрабатывающая фреза, нож, угол установки лезвия, скользящее резание, винтовая поверхность, энергоемкость, нагрузка, почва.

During the operation, standard L-shaped knives are exposed to various loads. The shape of the L-shaped knife blades does not meet the requirement of performing sliding cutting, which leads to an increase in the energy intensity of milling the soil. To ensure optimal cutting conditions without weed-covering and knife blocking, it is necessary that in any section of the blade (in the plane of rotation) the angle of its setting γ (cutting) is constant. Therefore, the blade of the knife should be made on a screw line, which will ensure its smooth entry and sliding cutting when moving in the soil. The purpose of the study is to improve the quality and reduce the energy consumption of soil cultivation by selecting a rational angle for installing the blade and optimizing the parameters of the screwed L-shaped cutter blades. To study the work and the loading process of the screw L-shaped cutter knife, the finite element method was used from the APM FEM application library of the KOMPAS-3D system. The design of the knife was broken into elements to show their movements and deformations through the displacements of the boundary points (knots) of the element, then the nodal displacements, deformations and stresses were determined. In the course of the study, the dependence of the values of linear displacements and stress values was studied depending on the angle of installation of the knife blade ($\gamma = 35^\circ \dots 60^\circ$). The results of the study showed that as the angle of the blade was increased to $\gamma = 60^\circ$, the total linear displacements decreased by 18 % reaching 0,6978 mm, compared to $\gamma = 35^\circ$ (0,8455 mm) at a maximum load of 2000 N. The knife with an installation angle $\gamma = 60^\circ$ has safety factor values higher than a knife with $\gamma = 35^\circ$ for all load stages (500, 1000, 1500 and 2000 N). The screw knife with a large installation angle is most suitable for milling soil with slip, which is typical for sod processing. As a result of the research it was proposed to use knives with a screw working surface for milling the soil with high quality.

Keywords: tiller, knife, angle of blade installation, sliding cutting, helical surface, energy intensity, load, soil.

Введение

Выбор рационального и эффективного способа обработки почвы является основой для обеспечения энергосберегающих технологий сельскохозяйственного производства. Одну из ведущих ролей в этом процессе играет использование фрезерных почвообрабатывающих машин с приводом рабочих органов от вала отбора мощности трактора. В системе современной почвообработки машины с активными рабочими органами (фрезы, бороны) позволяют наиболее полно и рационально использовать весь диапазон мощности двигателя энергонасыщенных тракторов.

Почвообрабатывающие фрезы давно зарекомендовали себя с положительной стороны. Анализ исследований показал эффективность обработки почвы этими машинами, в частности тяжелыми по механическому составу. Достоинства фрезерных машин: хорошие крошение почвы, заделка удобрений и растительных остатков, уничтожение сорняков. В результате получаем условия для оптимального роста и развития растений путем улучшения водно-воздушного и теплового режимов почвы, ее структурности. Однако фрезы не избежали недостатков, которые ограничивают их широкое применение на полях сельскохозяйственных предприятий. К ним можно отнести: большой вес, недостаточная надежность отдельных узлов конструкции, высокое значение энергоемкости процесса фрезерования почвы [1].

Фрезы комплектуются ножами различной формы: Г-образные, прямые, изогнутые, геликоиды, рыхлящие ножи и др. Анализ конструктивных схем и технических характеристик современных почвообрабатывающих фрез показал, что наиболее распространены Г-образные ножи, которые универсальны и несложны в изготовлении. Однако они отрезают почвенную стружку и перерезают сорняки без условия скольжения, что чревато повышением энергоемкости и забиванием растительностью. Прямые ножи при входе в почву соприкасаются с ней всей длиной лезвия, приводят к возникновению ударных напряжений в конструкции ножей и элементах привода фрезы [2].

Геометрические размеры Г-образных ножей изменяются в широких пределах, а форма их очень разнообразна. Так, угол стреловидности вертикальной стойки $\varepsilon_0 = 30...90^\circ$, подрезающей части $\varepsilon_0 = 35...90^\circ$, радиус загиба $r = 0,015...0,08$ м; режущая кромка вертикаль-

ной стойки и подрезающей части у некоторых типов фрез прямолинейная, у других же – криволинейная (винтовая в том числе) [3].

Поэтому актуальной является задача повышения технического уровня почвообрабатывающих фрез с целью снижения энергоемкости при высоких показателях качества обработки почвы. В статье рассмотрим вопросы выбора и обоснования оптимальных конструктивно-технологических параметров рабочих органов (ножей) фрез. Эти параметры в основном определяют энергозатраты работы фрезы, качество обработки почвы и нагрузки в узлах привода.

Чтобы обеспечить постоянство угла установки плоскости крыла ножа в любой точке лезвия, получить ровное дно борозды и безударное вхождение лезвия в почву (при условии скользящего резания), лезвие ножа выполняем по винтовой линии. Нож фрезы, имеющий винтовую поверхность (в зоне загиба и крыла), показан на рис. 1 [4].

Уравнения винтовой линии режущей кромки для указанного ножа имеют следующий вид [5]:

$$\left. \begin{aligned} x &= R \cdot \sin(\sigma + \nu); \\ y &= -R \cdot \cos(\sigma + \nu); \\ z &= R \cdot \operatorname{tg} \tau \nu, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ν – переменный угловой параметр, определяющий величину угла поворота образующей вокруг оси ротора; R – радиус ротора; τ – угол подъема винтовой линии; σ – угол установки.

Из уравнений (1) следует, что расстояние R от линии лезвия ножа до оси барабана и угол ее подъема постоянны. Если лезвие ножа выполнено по винтовой линии, то угол между касательной в любой точке лезвия ножа и перпендикуляром к радиусу R в плоскости вращения везде постоянен. С использованием приведенных уравнений и конструктивно-технологических параметров фрезы ФА-0,76 сконструированы и изготовлены ножи с винтовыми элементами.

Нельзя создать качественные и надежные узлы и детали почвообрабатывающих орудий без их всестороннего инженерного анализа, который сейчас выполняется с помощью современных программных средств и способствуют принятию на его основе грамотных конструкторских решений. Под инженерным анализом понимается исследование напряженно-деформированного состояния моделей проектиру-

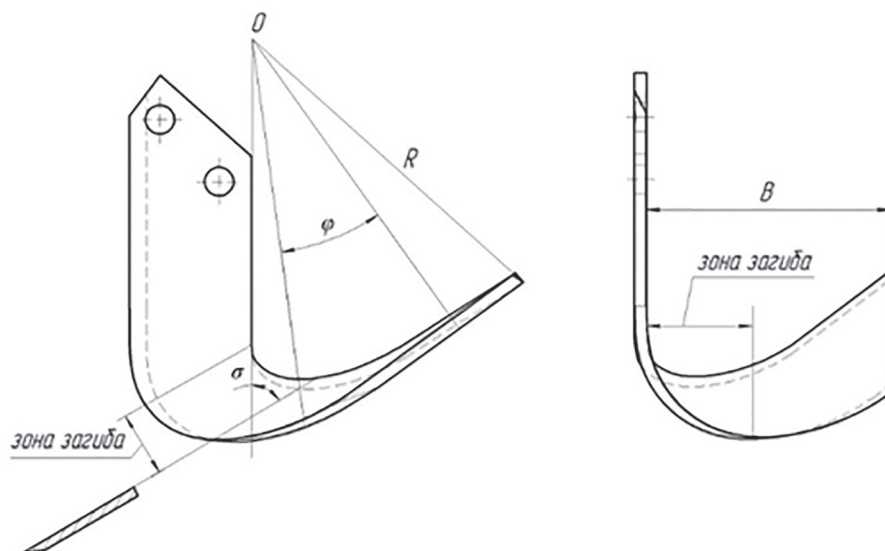


Рис. 1. Г-образный рабочий орган с винтовой поверхностью:

R – радиус ротора; σ – угол установки; B – ширина захвата рабочего органа;
 φ – угол обхвата режущей кромки

емых ножей фрезерных машин, получение их динамических характеристик и характеристик устойчивости при постоянных и переменных режимах внешнего нагружения.

Цель исследования

Целью исследования является повышение качества и снижение энергозатрат обработки почвы путем выбора оптимальных параметров винтовых Г-образных ножей фрезы.

Материалы и методы

За объект исследования выбран винтовой нож фрезы, закрепленный на диске фрезбарабана. Нож фрезы взаимодействует с обрабатываемой средой – почвой. В процессе отрезания и деформации почвы возникают реакции и моменты сопротивления. Для изучения процесса нагружения ножа наиболее эффективным приближенным методом является метод конечных элементов, с учетом выбранного контролируемого параметра (угла установки лезвия ножа γ).

Для полноценного конечно-элементного анализа необходимо [6]:

- построить модель проектируемого винтового ножа в трехмерном пространстве (рис. 2);
- привести разбиение модели ножа на конечные элементы (рис. 3);
- выполнить весь комплекс необходимых вычислений;
- определить узловые смещения, деформации и напряжения в разных областях конструкции винтового ножа фрезы.



Рис. 2. Модель винтового ножа в трехмерном пространстве

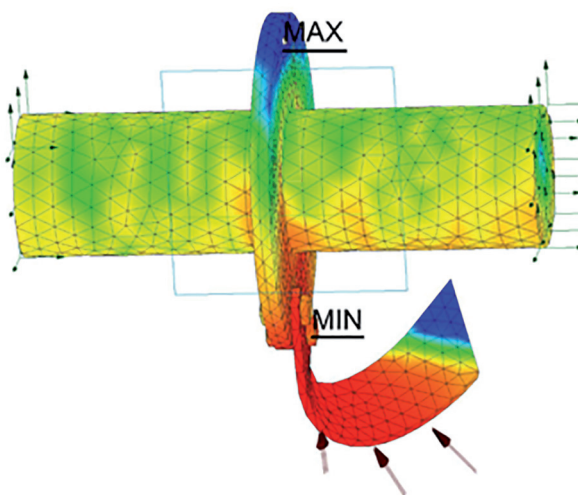


Рис. 3. Разбиение ножа на конечные элементы в программе

- визуализировать полученные результаты и корректно интерпретировать их с целью принятия правильных конструкторских решений.

Реализация метода конечных элементов заключается в следующем: целостная модель конструкции винтового ножа заменяется дискретной путем разбиения ее на области – конечные элементы. В каждой области поведение модели описывается с помощью отдельного набора функций, представляющих собой напряжения и перемещения. Конечные элементы соединяются узлами. Взаимодействие конечных элементов друг с другом осуществляется только через узлы. Конечные элементы, расположенные определенным образом, в зависимости от конструкции объекта, закрепленные в соответствии с граничными условиями, позволяют адекватно описать все многообразие моделей конструкций и деталей [6].

К конечному элементу могут быть приложены внешние нагрузки (сосредоточенные и распределенные силы и моменты), которые приводятся к узлам данного элемента и носят название узловых нагрузок.

При расчетах винтового ножа методом конечных элементов вначале определяются перемещения узлов его модели. Величины внутренних усилий в элементе пропорциональны перемещениям в узлах элемента. Коэффициентом пропорциональности выступает квадратная матрица жесткости элемента, количество строк которой равно числу степеней свободы элемента (в общем случае это есть произведение числа степеней свободы в узле на число узлов элемента). Все остальные параметры конечного элемента, такие как внутренние усилия, напряжения, поле перемещений и т.п., вычисляются на основе его узловых перемещений.

Основными типами применяемых на практике конечных элементов являются: стержневые, пластинчатые, объемные, специальные (типа совместных перемещений или упругих связей).

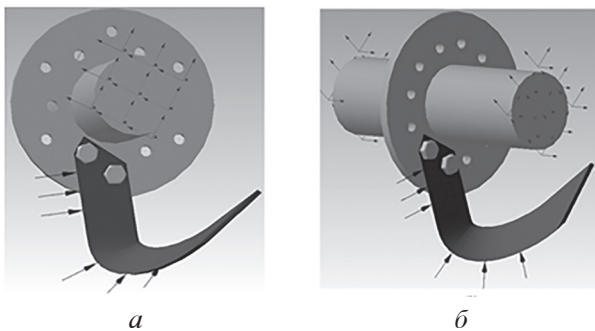


Рис. 4. Винтовые ножи с углами установки лезвия 35° (а) и 60° (б)

Для проведения расчета, с учетом условий работы ножа фрезерного культиватора, были заданы следующие параметры: материал ножа – сталь 65Г, модуль упругости $E = 212000$ МПа, модуль сдвига $G = 82000$ МПа, твердость HRC = 46...52. Также были заданы геометрические параметры винтового ножа для фрезы ФА-0,76, полученные с учетом теоретических исследований [7].

Максимальная нагрузка P выбиралась с учетом удельного сопротивления почвы и была принята за 2000 Н. Интервал изменения нагрузки – 500 Н.

Закрепление ножа на диске принимаем с углами установки лезвия $\gamma = 35^\circ$ и $\gamma = 60^\circ$ (рис. 4). Рассмотрим напряжения, возникающие в рабочем органе при отрезании почвенной стружки. Движение ножа в почве носит сложный характер, поэтому величину деформации будем рассматривать в направлении трех осей координат.

Линейные перемещения (деформации), возникающие в различных элементах конструкции винтового ножа при воздействии приложенных нагрузок ($P = 2000$ Н) в зависимости от величины угла установки, показаны на рис. 5 и 6.

Результаты автоматизированного расчета перемещений элементов конструкции ножа сведены в табл. 1.

На рис. 7 приведена зависимость линейных перемещений S от величины прилагаемой нагрузки P и величины угла установки лезвия γ рабочего органа.

Линейные перемещения имеют наибольшие значения по оси OY на крыле ножа, выполняющем завершающую часть процесса отрезания почвенной стружки. Суммарные линейные

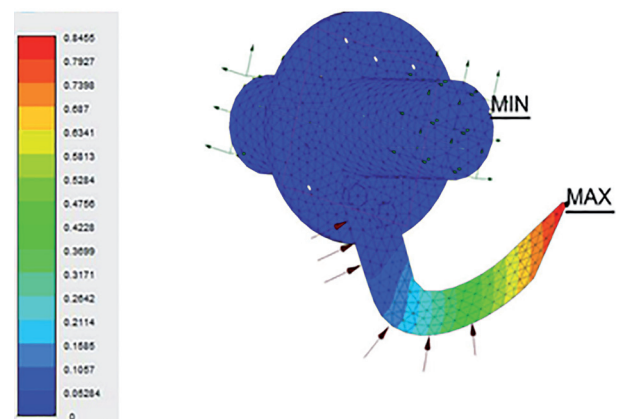


Рис. 5. Суммарное линейное перемещение ($P = 2000$ Н и $\gamma = 35^\circ$)

Таблица 1

Линейные перемещения (деформации) элементов конструкции ножей по осям координат

Угол установки лезвия γ	Нагрузка, P , Н	Перемещение по оси OX , мм	Перемещение по оси OY , мм	Перемещение по оси OZ , мм	Суммарное перемещение, мм
60°	500	0,01825	0,1077	0,00162	0,1744
	1000	0,03651	0,2154	0,00324	0,3489
	1500	0,05474	0,3231	0,00486	0,5231
	2000	0,07307	0,4309	0,00648	0,6978
35°	500	0,00198	0,06907	0,00190	0,2113
	1000	0,00393	0,1381	0,00381	0,4228
	1500	0,00591	0,2072	0,00571	0,6341
	2000	0,01787	0,7863	0,00761	0,8455

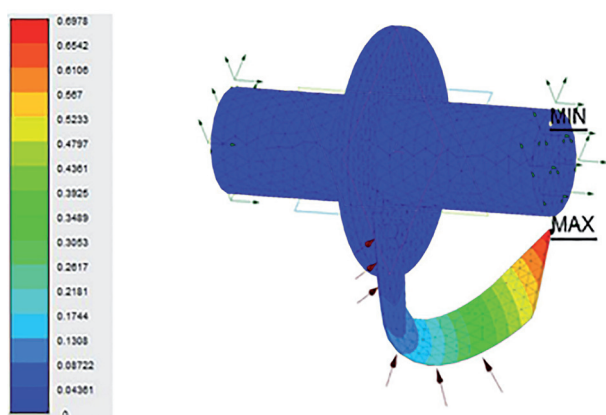


Рис. 6. Суммарное линейное перемещение ($P = 2000$ Н и $\gamma = 60^\circ$)

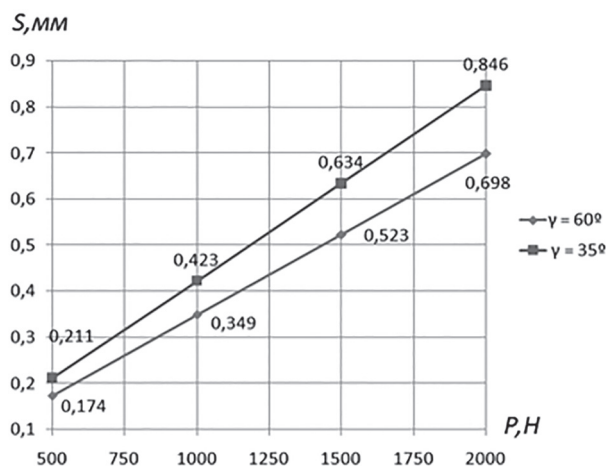


Рис. 7. Зависимость суммарных линейных S перемещений от нагрузок P и угла установки γ винтового ножа

перемещения S имеют меньшую величину (0,6978 мм) при использовании ножа с углом установки лезвия $\gamma = 60^\circ$.

Приведем распределение величины коэффициента запаса по прочности в элементах конструкции ножа. Знание величины коэффициента запаса прочности необходимо для того, чтобы обеспечить безопасную, надежную

работу конструкции и отдельных ее частей, несмотря на возможные неблагоприятные отклонения действительных условий их работы от расчетных.

На рис. 8 и 9 показаны распределения коэффициента запаса прочности по конструкции рабочего органа в зависимости от степени нагружения ($P = 2000$ Н) и угла установки лезвия ножа.

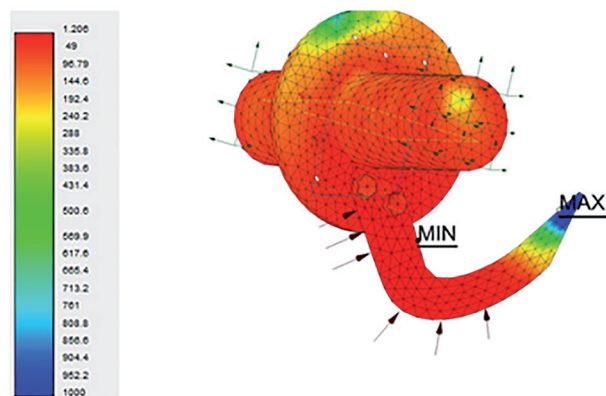


Рис. 8. Значение коэффициента запаса прочности ($P = 2000$ Н и $\gamma = 35^\circ$)

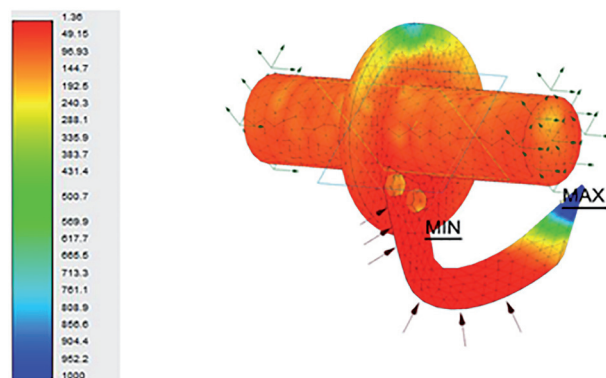


Рис. 9. Значение коэффициента запаса прочности ($P = 2000$ Н и $\gamma = 60^\circ$)

Значения коэффициента запаса по прочности n

Угол установки лезвия γ	Нагрузка, P , Н	Минимальное значение n	Максимальное значение n
60°	500	5,439	1000
	1000	2,719	1000
	1500	1,813	1000
	2000	1,36	1000
35°	500	4,822	1000
	1000	2,411	1000
	1500	1,607	1000
	2000	1,206	1000

Результаты автоматизированного расчета коэффициента запаса прочности конструкции винтового ножа сведены в табл. 2.

Общий коэффициент запаса прочности (n) расчлняем на ряд составляющих, частных коэффициентов запаса прочности, каждый из которых отражает влияние на прочность элемента конструкции какого-либо определенного фактора или группы факторов. Например, один из коэффициентов отражает возможные отклонения механических характеристик материала от принимаемых в качестве расчетных, другой – отклонения величин действующих нагрузок от их расчетных значений и т.д.

На рис. 10 приведены зависимости величины предела прочности конструкции ножа от его угла установки лезвия и степени нагрузки на него.

Для винтового рабочего органа с углом установки лезвия $\gamma = 60^\circ$ значения коэффициента запаса прочности выше, чем для ножа с $\gamma = 35^\circ$ по всем ступеням нагрузки ($P = 500, 1000, 1500$ и 2000 Н). Следовательно, для практического применения более подходящим является нож с углом установки лезвия $\gamma = 60^\circ$.

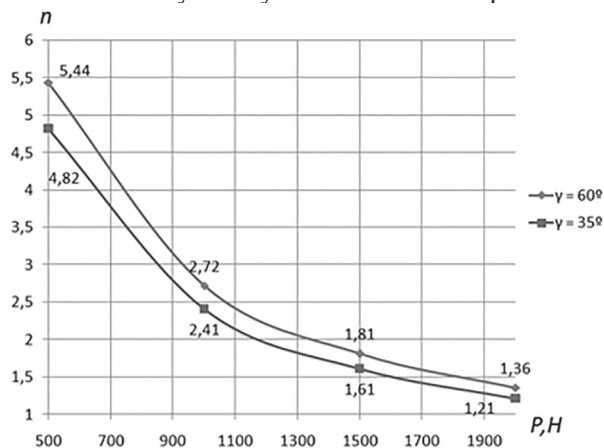


Рис. 10. Значения коэффициента запаса прочности n в зависимости от нагрузки P и угла установки ножа γ

Результаты и обсуждение

Анализ полученных данных моделирования процесса нагрузки ножа с винтовой поверхностью показывает, что при использовании рабочего органа с углом установки лезвия $\gamma = 60^\circ$ линейные перемещения (деформации) по осям OX , OY и OZ имеют меньшие значения, чем с ножом, имеющим угол установки $\gamma = 35^\circ$. В итоге, суммарные перемещения ножа с $\gamma = 60^\circ$ составили на 18 % меньше (0,6978 мм), чем у ножа с $\gamma = 35^\circ$ (0,8455 мм).

Активный рабочий орган с большим углом установки лезвия показал лучшие результаты по коэффициенту запаса прочности элементов конструкции на всех ступенях нагружения ($n = 1,36$ при $P = 2000$ Н). Винтовой нож с $\gamma = 35^\circ$ показал следующий результат: $n = 1,206$ при $P = 2000$ Н. Разница составила 11,32 %.

Выводы

1. Переднюю грань лезвия Г-образного ножа фрезерного культиватора следует устанавливать под определенным углом γ . Чтобы сохранить этот угол постоянным в процессе отрезания почвенной стружки, получить ровное дно борозды, обеспечить безударное вхождение лезвия ножа в почву, его необходимо выполнить по винтовой линии.

2. Если лезвие ножа выполнено по винтовой линии, то расстояние R от линии лезвия до оси барабана, угол ее подъема постоянны. Это определяет условие, когда угол между касательной в любой точке лезвия ножа и перпендикуляром к радиусу R в плоскости вращения везде постоянен.

3. На этапе проектирования ножей фрезерного культиватора для получения рациональных параметров целесообразно использовать

метод конечных элементов из пакета библиотеки программы КОМПАС-3Д.

4. По результатам моделирования наиболее подходящим для практического применения оказался рабочий орган, имеющий угол установки $\gamma = 60^\circ$. Параметры ножа обеспечивают условие скользящего резания и снижение энергоемкости фрезерования при высоком качестве обработки почвы.

Литература

1. Чаткин М. Н. Кинематика и динамика ротационных почвообрабатывающих рабочих органов с винтовыми элементами. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2007. 398 с.
2. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Корявин С.М., Ломакина К.В. Обоснование параметров и формы активных рабочих органов двойного действия почвообрабатывающих фрез // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти д.т.н., профессора Ф.Х. Бурумкулова. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2016. С. 335–340.
3. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Овчинников В.А. Характеристика рабочих органов с винтовой поверхностью фрезерных почвообрабатывающих машин // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы X Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти проф. С.А. Лапшина, Саранск, 17–18 апр. 2014 г. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2014. С. 308–313.
4. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Лещанкин А.И., Купряшкин В.Ф. Нож почвообрабатывающей фрезы: патент на полезную модель № 93199, Российская Федерация. Опубликовано 27.04.2010. Бюл. № 12.
5. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Овчинников В.А. Вопросы проектирования ножей почвообрабатывающих фрез с условием скользящего резания // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2013. С. 22–25.
6. Фокин В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2010. 131 с.
7. Лещанкин А.И. Теоретические основы ротационных почвообрабатывающих рабочих органов с винтовыми поверхностями. Саратов: изд-во Саратовского ун-та, 1986. 208 с.

References

1. Chatkin M.N. Kinematika i dinamika rotatsionnykh pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov s vintovymi elementami [Kinematics and dynamics of rotary tillers with screw elements]. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta Publ., 2007. 398 p.
2. Dranyaev S.B., Chatkin M.N., Koryavin S.M., Lomakina K.V. Substantiation of parameters and form of active working organs of double action of tillage cutters. Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy: sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati d.t.n., professora F.Kh. Burumkulova [Energy-efficient and resource-saving technologies and systems: collection of scientific works of international scientific and practical conference dedicated to memory of Doctor of Technical Sciences, Professor F.Kh. Burumkulov]. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta Publ., 2016, pp. 335–340 (in Russ.).
3. Dranyaev S.B., Chatkin M.N., Ovchinnikov V.A. Characteristics of working elements with a screw surface of milling tillers. Resursosberegayushchie ekologicheski bezopasnye tekhnologii proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaystvennoy produktsii: materialy Kh Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. pamyati prof. S.A. Lapshina [Resource-saving environmentally safe technologies of production and processing of agricultural products: materials of X international scientific and practical conference dedicated to the memory of professor S.A. Lapshin], Saransk, 17–18 apr. 2014 g. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta Publ., 2014, pp. 308–313 (in Russ.).
4. Dranyaev S.B., Chatkin M.N., Leshchankin A.I., Kupryashkin V.F. Nozh pochvoobrabatyvayushchey frezy [The knife of the tiller]: patent na poleznuyu model'. No 93199, Rossiyskaya Federatsiya. Opublikovano 27.04.2010. Byul. No 12.
5. Dranyaev S.B., Chatkin M.N., Ovchinnikov V.A. The problems of designing knives for tillers with the condition of sliding cutting. Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy: mezhdunar. sb. nauch. tr. [Energy-efficient and resource-saving technologies and systems: interuniversity collection of scientific works]. Saransk: Izd-vo Mordovskogo un-ta Publ., 2013, pp. 22–25 (in Russ.).
6. Fokin V.G. Metod konechnykh elementov v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela [Finite element method in mechanics of deformable solids]. Samara: Samarskiy gos. tekhn. un-t Publ., 2010. 131 p.
7. Leshchankin A.I. Teoreticheskie osnovy rotatsionnykh pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov s vintovymi poverkhnostyami [Theoretical foundations of rotary tillers with screw surfaces]. Saratov: izd-vo Saratovskogo un-ta Publ., 1986. 208 p.